

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ



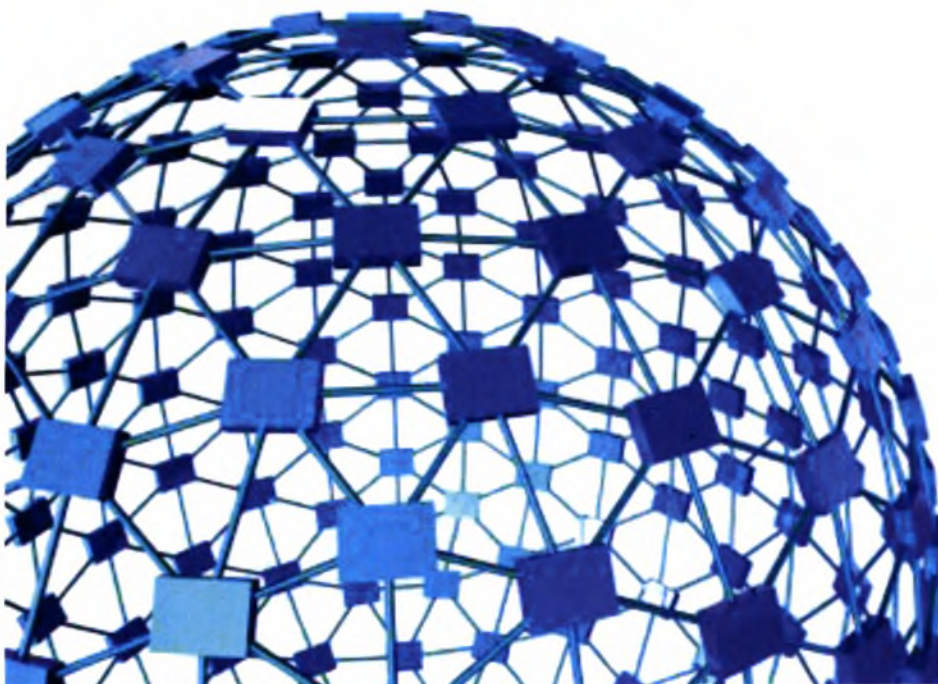
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχιτεκτονικές Δικτυακής Κωδικοποίησης

ΟΝΟΜΑ: Γαλανού Ελένη

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Τασιούλας Λέανδρος

Κουτσόπουλος Ιορδάνης



Βόλος, Οκτώβριος 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6621/1
Ημερ. Εισ.: 13-10-2008
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΗΥΤΔ
2008
ΓΑΛ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου, Νίκο και Μαρία, τα αδέρφια μου, Τέτα, Νατάσα και Κώστα, καθώς και τους φίλους μου και τον Ανδρέα που με στήριξαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, Λέανδρο Τασιούλα και Ιορδάνη Κουτσόπουλο, για την καθοδήγησή τους.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2. NETWORK CODING.....	5
2.1 Δικτυακή Κωδικοποίηση (Network Coding)	5
2.2 Κωδικοποίηση και Αποκωδικοποίηση	5
2.3 Παραδείγματα.....	6
2.4 Οφέλη	8
2.5 Εφαρμογές Network Coding	9
3. COPE	12
3.1 COPE.....	12
3.2 Γενική Επισκόπηση	14
3.3 Μεγέθη Απόδοσης COPE.....	16
3.4 Σχεδιαστικές Αρχές	20
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	25
4.1 Μετρήσεις σε Ασύρματα Δίκτυα.....	25
4.2 Μετρήσεις σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	30
5. ΣΥΝΟΨΗ	30
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	35
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	38

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην σύγχρονη εποχή όλα τα δίκτυα επικοινωνίας ακολουθούν την ίδια θεμελιώδη αρχή λειτουργίας: Ανεξάρτητες ροές πληροφορίας μοιράζονται τους πόρους του δικτύου αλλά τα δεδομένα παραμένουν χωρισμένα. Η δρομολόγηση, η αποθήκευση, ο έλεγχος των πληροφοριών και όλες οι άλλες δικτυακές λειτουργίες βασίζονται σε αυτήν ακριβώς την υπόθεση. Η δικτυακή κωδικοποίηση (network coding) είναι μια νέα τεχνική σχεδιασμένη για αποδοτική και ανθεκτική παράδοση πακέτων σε δίκτυα δεδομένων η οποία ξεφεύγει από τα όρια αυτής της υπόθεσης επιτρέποντας στους κόμβους του δικτύου να συνδυάζουν διαφορετικές ροές δεδομένων. Στο κεφάλαιο 2 εισάγεται η έννοια του network coding και περιγράφεται η μέθοδος της κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Γίνεται επεξήγηση παραδειγμάτων και αναλύονται τα οφέλη που παρατηρούνται. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται το COPE, μία αρχιτεκτονική δικτυακής κωδικοποίησης για ασύρματα δίκτυα. Ορίζονται μεγέθη απόδοσης, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι σχεδιαστικές αρχές στις οποίες στηρίζεται και αναλύονται παραδείγματα τα οποία είναι ενδεικτικά του κέρδους το οποίο επιφέρει το COPE. Στο κεφάλαιο 4, μέσω προσομοίωσης του COPE, γίνονται πειραματικές μετρήσεις σε ασύρματα δίκτυα και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 συνοψίζεται η απόδοση του COPE.

2. NETWORK CODING

2.1 Δικτυακή Κωδικοποίηση (Network Coding)

Το network coding είναι μία μέθοδος μεγιστοποίησης της ροής δεδομένων σε ένα δίκτυο η οποία έχει εφαρμοστεί σε πολλά συστήματα δικτύων με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Βασίζεται στην ιδέα της σύμπτυξης ξεχωριστών ροών πληροφορίας σε μία μέσω κατάλληλης κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης της ροής αυτής από τους ενδιαφερόμενους παραλήπτες.

Χωρίς network coding, οι ενδιάμεσοι δρομολογητές απλά ενδυναμώνουν και προωθούν τα δεδομένα στους τελικούς παραλήπτες τους. Συνεπώς διαφορετικά ρεύματα πληροφορίας μοιράζονται τους πόρους του δικτύου. Όταν γίνεται όμως χρήση του network coding, οι ενδιάμεσοι δρομολογητές έχουν την δυνατότητα να συμπυκνώνουν τα ήδη ληφθέντα πακέτα σε ένα πακέτο προς αποστολή. Αυτή η διαδικασία λέγεται κωδικοποίηση και πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε το πακέτο αυτό να μπορεί στη συνέχεια να αποκωδικοποιηθεί και κάθε παραλήπτης να ανακτήσει το πακέτο που του αντιστοιχεί. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποστολή πολλαπλών πακέτων σε μία μόνο μετάδοση.

2.2 Κωδικοποίηση και Αποκωδικοποίηση

Κωδικοποίηση

Έστω ένα σύνολο πακέτων M^1, \dots, M^n που έχουν παραχθεί από κάποιες πηγές. Στο γραμμικό network coding κάθε κωδικοποιημένο πακέτο X αντιστοιχίζεται σε ένα σύνολο παραγόντων g_1, \dots, g_n που ανήκουν στο \mathcal{F}_n και ισούται με $X_k = \sum_{i=1}^n g_i M_k^i$ όπου M_k^i και X_k είναι το k -οστό σύμβολο του M^i και X αντίστοιχα. Στο παράδειγμα της Εικόνας 1 το πεδίο είναι το $\mathcal{F}_2 = \{0,1\}$, ένα σύμβολο είναι ένα bit και ο γραμμικός συνδυασμός που στέλνεται από τον S είναι $M^1 \oplus M^2$, δηλαδή πρόσθεση στο πεδίο $\mathcal{F}_2 = \{0,1\}$.

Το $g=(g_1, \dots, g_n)$ ονομάζεται διάνυσμα κωδικοποίησης (encoding vector) και τα κωδικοποιημένα δεδομένα $X = \sum_{i=1}^n g_i M^i$ ονομάζονται διάνυσμα πληροφορίας (information vector). Το encoding vector χρησιμοποιείται από τους παραλήπτες για την αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Για παράδειγμα, το encoding vector $e=(0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ όπου το 1 βρίσκεται στην i θέση σημαίνει ότι το information vector ισούται με το M^i , δηλαδή το πακέτο δεν είναι κωδικοποιημένο.

Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνεται επαναληπτικά, δηλαδή να εφαρμόζεται ακόμα και πάνω σε ήδη κωδικοποιημένα πακέτα. Έστω ότι σε έναν κόμβο λαμβάνονται τα κωδικοποιημένα πακέτα $(g^1, X^1), \dots, (g^m, X^m)$. Αυτός ο κόμβος μπορεί να παράγει ένα νέο κωδικοποιημένο πακέτο (g', X') διαλέγοντας ένα σύνολο παραγόντων h_1, \dots, h_m και δημιουργώντας τον συνδυασμό $X' = \sum_{j=1}^m h_j X^j$. Το αντίστοιχο encoding vector σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι το (h_1, \dots, h_m) αλλά δίνεται από την έκφραση $g'_i = \sum_{j=1}^m h_j g_i^j$.

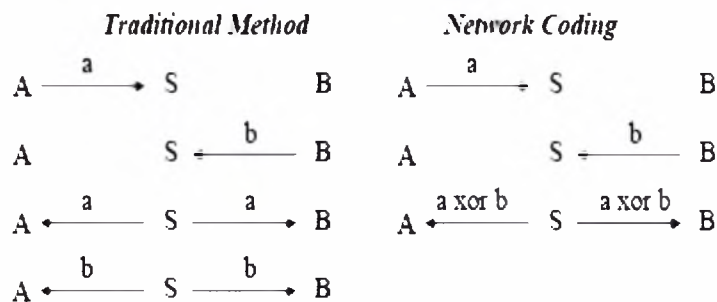
Αποκωδικοποίηση

Έστω ότι ένας κόμβος λαμβάνει το σύνολο των $(g^1, X^1), \dots, (g^m, X^m)$. Για να ανακτήσει ο κόμβος τα αρχικά πακέτα πρέπει να λύσει το γραμμικό σύστημα $\{ X^j = \sum_{i=1}^n g_i^j M^i \}$ με m εξισώσεις και n αγνώστους M^i . Για να είναι δυνατόν να ανακτηθούν όλα τα δεδομένα θα πρέπει $m \geq n$, δηλαδή τα ληφθέντα πακέτα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσα όσα τα αρχικά πακέτα. Η συνθήκη $m \geq n$ όμως δεν είναι αρκετή καθώς μερικοί γραμμικοί συνδυασμοί ληφθέντων κωδικοποιημένων πακέτων μπορεί να είναι γραμμικά εξαρτημένοι.

2.3 Παραδείγματα

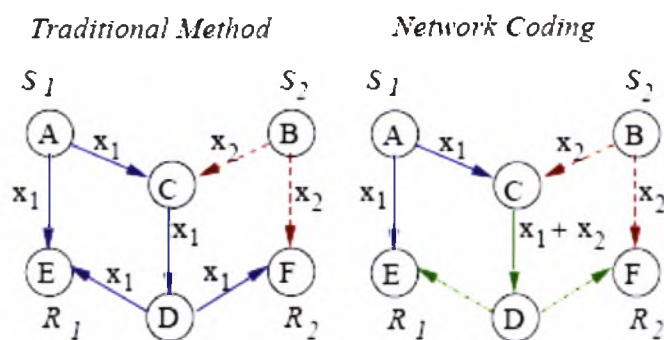
Στην Εικόνα1 φαίνεται ένα απλό δίκτυο τριών κόμβων όπου οι κόμβοι A και B ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω του ασύρματου σταθμού βάσης S. Με την παραδοσιακή μέθοδο για την ανταλλαγή 2 πακέτων θα ήταν απαραίτητες 4 μεταδόσεις. Εφαρμόζοντας όμως network coding ο S δε θα χρειαστεί να στείλει το πακέτο a και το πακέτο b σε 2 διαφορετικές διαδοχικές μεταδόσεις. Στο 3ο βήμα ο S θα συνδυάσει γραμμικά τα 2

πακέτα χρησιμοποιώντας την λειτουργία XOR. Το παραγόμενο πακέτο $p(a \text{ xor } b)$ θα σταλεί μέσω πανεκπομπής (broadcasting) και στους 2 κόμβους. Ο Α θα λάβει το πακέτο $p(a \text{ xor } b)$ και έχοντας αποθηκεύσει το a που έστειλε προηγουμένως θα κάνει την αποκωδικοποίηση $[(a \text{ xor } b) \text{ xor } a] = b$ και θα ανακτήσει το πακέτο b που τον ενδιαφέρει. Ομοίως ο Β θα εξάγει το πακέτο a . Συνεπώς η ανταλλαγή των πακέτων θα γίνει σε 3 μεταδόσεις αντί για 4.



Εικόνα 1

Τα οφέλη του network coding επεκτείνονται και σε ασύρματα δίκτυα με multicast ροές. Αυτό γίνεται εμφανές στο παρακάτω παράδειγμα. Στην Εικόνα2 υπάρχουν 2 πηγές S_1, S_2 που η κάθε μία αποστέλλει πακέτα δεδομένων ενός bit με προορισμό 2 κόμβους, τους R_1, R_2 . Υποθέτουμε ότι κάθε ζεύξη είναι μοναδιαίας χωρητικότητας. Με την μέθοδο της συμβατική δρομολόγησης είναι αδύνατο να επιτύχουμε ρυθμό 2bits/sec προς τους 2 παραλήπτες. Με network coding όμως, ο C κωδικοποιεί τα πακέτα X_1, X_2 που διανύουν την ζεύξη CD, το παραγόμενο πακέτο προωθείται μέχρι τους παραλήπτες και αποκωδικοποιείται εκεί φτάνοντας έτσι ρυθμό μετάδοσης ίσο με 2bits/sec.



Εικόνα 2

2.4 Οφέλη

Τα οφέλη που μπορεί να αποφέρει η χρήση network coding αναφέρονται κυρίως στα εξής:

- **Κέρδος σε χωρητικότητα:** Με την κωδικοποίηση πολλών πακέτων σε ένα από έναν ενδιαμέσο κόμβο και την αποκωδικοποίηση του από τους παραλήπτες των αρχικών πακέτων επιτυγχάνεται η πιο οικονομική χρήση των πόρων του δικτύου. Αντί για την ξεχωριστή μετάδοση κάθε πακέτου στέλνονται όλα τα δεδομένα μαζί σε μία μετάδοση με αποτέλεσμα την μείωση της συμφόρησης του δικτύου. Συνεπώς, το κερδισμένο εύρος ζώνης χρησιμοποιείται από άλλους κόμβους για προώθηση νέων δεδομένων αυξάνοντας τελικά την χωρητικότητα του δικτύου.
- **Ανοχή σε σφάλματα:** Τα πακέτα που μεταφέρονται στο δίκτυο δεν είναι όλα εξίσου εύκολο να παραληφθούν από τους αποδέκτες τους. Ένα πακέτο μπορεί να αργήσει πολύ μέχρι να φτάσει στον προορισμό του ή να απορριφθεί από κάποια γεμάτη ουρά οπότε να μην φτάσει ποτέ ή αν η σύνδεση είναι χαμηλής ποιότητας να ληφθεί με κάποιο σφάλμα. Αυτό καθιστά κάποια πακέτα πιο δυσεύρετα από τα υπόλοιπα οπότε και πιο σημαντικά. Το network coding λύνει αυτό το πρόβλημα. Τα κωδικοποιημένα πακέτα είναι όλα εξίσου σημαντικά καθώς ένας παραλήπτης είναι σε θέση να αποσπάσει τα δεδομένα που τον ενδιαφέρουν αρκεί να λάβει αρκετά κωδικοποιημένα πακέτα. Η επιτυχημένη παραλαβή πληροφορίας δεν συνίσταται πια στην επιτυχημένη παραλαβή συγκεκριμένων πακέτων αλλά στην λήψη ενός ικανοποιητικού αριθμού οποιονδήποτε κωδικοποιημένων, ανεξάρτητων πακέτων. Δεν έχει σημασία ποια πακέτα θα λάβει ο παραλήπτης αλλά μόνο πόσα. Επίσης ακόμα και αν ένα κωδικοποιημένο πακέτο χαθεί δεν προκαλείται πρόβλημα καθώς το πληροφοριακό του περιεχόμενο υπάρχει και σε άλλα κωδικοποιημένα πακέτα και μπορεί να εξαχθεί και να αναπαραχθεί από έναν κόμβο που έχει λάβει αρκετά πακέτα για την αποκωδικοποίησή τους.
- **Προσαρμοστικότητα:** Η κωδικοποίηση των πακέτων δεν γίνεται πια μόνο στην πηγή αλλά μπορεί να εφαρμοστεί από οποιονδήποτε κόμβο του δικτύου. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη στην τυπική περίπτωση όπου οι κόμβοι δεν έχουν καθολική

πληροφορία για την τοπολογία και την κατάσταση του δικτύου. Χωρίς network coding ένα πακέτο μπορεί να αποσταλεί σε έναν κόμβο που είναι ανενεργός και έτσι το πακέτο να χαθεί και να καταναλωθεί αναποτελεσματικά εύρος ζώνης. Ένα κωδικοποιημένο πακέτο όμως, θα παραληφθεί από όλους τους ενεργούς κόμβους σε κοντινή απόσταση και θα αποκωδικοποιηθεί από τους ενδιαφερόμενους. Ακόμα και αν οι ανενεργοί κόμβοι δεν λάβουν τα δεδομένα τους, το εύρος ζώνης δε θα σπαταληθεί καθώς το πακέτο θα αποκωδικοποιηθεί από τους ενεργούς.

2.5 Εφαρμογές Network Coding

Το Network Coding έχει δοκιμαστεί σε πολλές εφαρμογές και με αξιόλογα αποτελέσματα.

- **Ομότιμα Δίκτυα Διαμοιρασμού Αρχείων (P2P File Distribution)**

Ένα από τα πιο γνωστά συστήματα διαμοιρασμού αρχείων που χρησιμοποιεί network coding είναι το Avalanche. Στα δίκτυα αυτά ο εξυπηρετητής (server) χωρίζει κάθε μεγάλο αρχείο σε κομμάτια (blocks) . Οι πελάτες (clients) προσπαθούν να ανακτήσουν το αρχείο κατεβάζοντας blocks από τον server αλλά και ανταλλάσσοντας τα ήδη κατεβασμένα blocks μεταξύ τους. Στο Avalanche τα blocks που στέλνονται από τον server είναι γραμμικοί συνδυασμοί όλων των αρχικών block. Ομοίως οι κόμβοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους τυχαίους γραμμικούς συνδυασμούς των διαθέσιμων blocks μαζί με τους συντελεστές αποκωδικοποίησης. Συνεπώς η επιτυχημένη ανακατασκευή του αρχείου δεν εξαρτάται πια από την παραλαβή συγκεκριμένων πακέτων, μερικά από τα οποία μπορεί να φτάνουν σπάνια σε έναν κόμβο λόγω τοπολογίας. Εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των ληφθέντων κωδικοποιημένων, ανεξάρτητων πακέτων. Επίσης ακόμα και αν ο server αποχωρήσει πριν κατεβάσουν όλοι οι κόμβοι το αρχείο δεν προκαλείται πρόβλημα καθώς το πληροφοριακό περιεχόμενο του υπάρχει στα κωδικοποιημένα πακέτα και μπορεί να αναπαραχθεί από έναν κόμβο που έχει λάβει αρκετά πακέτα για την ανακατασκευή του αρχείου.

- Ασύρματα Δίκτυα (Wireless Networks)

Σε δίκτυα αμφίδρομης επικοινωνίας (π.χ. instant messaging, video conference) όπου 2 κόμβοι έχουν όμοιο αριθμό πακέτων προς ανταλλαγή οι δρομολογητές που βρίσκονται ενδιάμεσα διαθέτουν πακέτα προς αποστολή και προς τις 2 κατευθύνσεις. Κωδικοποιούν μέσω της λειτουργίας XOR κάθε φορά δύο πακέτα, ένα από κάθε κατεύθυνση, και το εκπέμπουν. Οι γειτονικοί δρομολογητές που το παραλαμβάνουν μπορούν να εξάγουν το πακέτο που τους ενδιαφέρει καθώς έχουν γνώση του άλλου που οι ίδιοι έστειλαν προηγουμένως. Συνεπώς διπλασιάζεται η χωρητικότητα του μονοπατιού. Η τεχνική αυτή επεκτείνεται και σε δίκτυα με πολλές unicast ροές όπου όλοι οι κόμβοι έχουν την δυνατότητα να κρυφακούν και αποθηκεύουν ξένα πακέτα διπλασιάζοντας σχεδόν την χωρητικότητα του δικτύου επίσης. Τέλος, σε δίκτυα με πολλές many-to-many broadcast ροές το network coding οδηγεί στην μείωση των απαιτούμενων μεταδόσεων για ένα σετ πακέτων. Αυτό συνεπάγεται την εξοικονόμηση και την πιο ευέλικτη διαχείριση των αποθεμάτων ενέργειας.

- Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Ad-Hoc Sensor Networks)

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων το network coding μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή η συγκεκριμένων πακέτων από έναν κόμβο – sink εφόσον αυτός ο κόμβος κάνει αίτηση σε οποιουσδήποτε η κόμβους-αισθητήρες. Έτσι αποφεύγεται η επικοινωνία με μακρινούς κόμβους και εξοικονομείται ενέργεια.

- Δικτυακή Τομογραφία (Network Tomography)

Η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα χαρακτηριστικά του δικτύου μέσω μετρήσεων και διερευνητικών πακέτων ονομάζεται δικτυακή τομογραφία (network tomography). Τα διερευνητικά πακέτα μίας πηγής που έχουν ως προορισμό πολλούς παραλήπτες μπορεί να αναπαραχθούν και να διαχωριστούν. Με την εφαρμογή δικτυακής κωδικοποίησης στο δίκτυο είναι επίσης δυνατόν τα διερευνητικά πακέτα που προέρχονται από πολλές πηγές αλλά έχουν ως παραλήπτη τον ίδιο κόμβο να συγχωνευτούν. Με αυτόν τον τρόπο όταν φτάσουν τα πακέτα στον προορισμό τους μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την τοπολογία, την καθυστέρηση και την απόδοση του δικτύου μειώνοντας έτσι σημαντικά τον αριθμό των διερευνητικών πακέτων και την φόρτωση των ζεύξεων.

- Δικτυακή Ασφάλεια (Network Security)

Κάνοντας χρήση network coding οι κόμβοι μπορούν να αποκωδικοποιήσουν έναν αριθμό πακέτων μόνο εφόσον έχουν παραλάβει επαρκή αριθμό γραμμικών ανεξάρτητων συνδυασμών. Αυτό αποτελεί μια μορφή ασφάλειας η οποία όμως είναι ασθενής καθώς ένας κακόβουλος χρήστης που διαθέτει τους $n-1$ από τους n συνδυασμούς μπορεί μαντεύοντας τον n -οστό να αποκτήσει πρόσβαση και στα n πακέτα. Επίσης, ένας ενδιάμεσος χρήστης που προσπαθεί να αλλοιώσει με συγκεκριμένο τρόπο την πληροφορία που θα λάβει ο παραλήπτης δε μπορεί να προβλέψει τι επιπτώσεις θα έχει η παρεμβολή του όταν τα πακέτα είναι κωδικοποιημένα. Η πληροφορία ναι μεν θα αλλοιωθεί αλλά δε θα πάρει την μορφή που θα ήθελε ο κακόβουλος χρήστης (attacker). Συνεπώς οι επιθέσεις ενδιάμεσου χρήστη (man-in-the-middle) γίνονται πιο δύσκολες.

3. COPE

3.1 COPE

Το COPE είναι μία αρχιτεκτονική δικτυακής κωδικοποίησης (network coding) ειδικά σχεδιασμένη για ασύρματα δίκτυα καθώς εκμεταλλεύεται την broadcast φύση του ασύρματου μέσου. Αναφέρεται κυρίως στην κοινή περίπτωση όπου κάθε πηγή στέλνει δεδομένα σε έναν παραλήπτη (unicast traffic). Είναι ένας μηχανισμός προώθησης πολλαπλών πακέτων με μία μόνο μετάδοση που χρησιμοποιεί ως γραμμικό κώδικα την λειτουργία XOR. Σκοπός της αρχιτεκτονικής αυτής είναι η αύξηση του πληροφοριακού περιεχομένου κάθε μετάδοσης και τελικά η αύξηση της χωρητικότητας. Γι' αυτόν το λόγο εισάγετε ένα επιπλέον στρώμα μεταξύ του IP και MAC επιπέδου το οποίο αναγνωρίζει τις ευκαιρίες κωδικοποίησης και βασίζεται σε συγκεκριμένες σχεδιαστικές αρχές που είναι απαραίτητες για την ενσωμάτωση του network coding στην δικτυακή στοίβα (network stack).

Το στρώμα αυτό ψάχνει στην ουρά κάθε κόμβου πακέτα προς αποστολή που πληρούν κάποιες προϋποθέσεις. Τα δεδομένα των πακέτων αυτών γίνονται xored και το παραγόμενο πακέτο εκπέμπεται στο ασύρματο μέσο αντί αυτών. Με αυτόν τον τρόπο σε μία μόνο μετάδοση αποστέλλονται πληροφορίες οι οποίες έχουν διαφορετικό παραλήπτη. Τα πακέτα που στέλνονται δεν αποθηκεύονται μόνο από τον παραλήπτη τους αλλά από όλους τους κόμβους που είναι σε μικρή ακτίνα από τους κόμβους που τα προώθησαν, από τους γείτονές, δηλαδή, που άκουσαν το πακέτο. Κάθε κόμβος γνωστοποιεί τακτικά στους υπόλοιπους ποια πακέτα έχει αποθηκεύσει μέσω των Αναφορών Λήψης (Reception Reports). Αυτή η πληροφορία είναι πολύ χρήσιμη για έναν κόμβο πριν την κωδικοποίηση καθώς πρέπει να είναι βέβαιο ότι κάθε παραλήπτης θα έχει αρκετή πληροφορία, δηλαδή τα απαραίτητα πακέτα, ώστε να αποκωδικοποιήσει τα δεδομένα και να λάβει το πακέτο που προορίζεται για αυτόν. Η ιδιότητα αυτή των κόμβων να αποθηκεύουν 'ξένα' πακέτα, τα οποία δεν προορίζονται για αυτούς ονομάζεται Opportunistic Listening. Μέσω του Opportunistic Listening αλλά και την σχετική ενημέρωση του υπόλοιπου δικτύου με Reception Reports αυξάνεται το κέρδος χωρητικότητας ακόμα περισσότερο καθώς καθίσταται δυνατή η κωδικοποίηση τριών ή ακόμα και περισσότερων πακέτων.

Το COPE βασίζεται σε δύο αρχές :

1. Δεν χρησιμοποιεί την λογική αφαίρεση της αποστολής πακέτων σημείο προς σημείο και τεχνικές δρομολόγησης σχεδιασμένες για ενσύρματα δίκτυα. Αντιθέτως αποδέχεται και εκμεταλλεύεται την φύση του ασύρματου μέσου που είναι η μετάδοση δεδομένων σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται μέσα στο εύρος μετάδοσης.
2. Χρησιμοποιεί network coding επιτρέποντας στους δρομολογητές να συνδυάζουν το πληροφοριακό περιεχόμενο διαφορετικών πακέτων σε ένα πριν τα προωθήσουν.

Στον Πίνακα1 περιγράφονται οι ορολογίες που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την μελέτη του COPE.

Ορολογία	Περιγραφή
Native Packet	Ένα μη-κωδικοποιημένο πακέτο.
Encoded/Xored Packet	Ένα πακέτο που είναι το αποτέλεσμα της λειτουργίας XOR πολλαπλών native πακέτων.
Nexthops of an Encoded Packet	Το σεν των επόμενων κόμβων-παραληπτών των πακέτων που σχημάτισαν ένα encoded πακέτο.
Packet Id	Η μοναδική ταυτότητα κάθε πακέτου.
Output Queue	Η FIFO ουρά κάθε κόμβου όπου αποθηκεύονται τα πακέτα προς προώθηση.
Packet Pool	Ένας buffer όπου κάθε κόμβος αποθηκεύει τα πακέτα που έστειλε, έλαβε ή κρυφάκουσε σε χρονικό διάστημα T δευτέρων.
Coding Gain	Ο λόγος του αριθμού των απαιτούμενων μεταδόσεων για την παράδοση κάποιου σεν πακέτων χωρίς την χρήση του COPE προς τον αριθμό των απαιτούμενων μεταδόσεων για την παράδοση του ίδιου σεν πακέτων κάνοντας χρήση του COPE.
Coding and MAC Gain	Το αναμενόμενο κέρδος χωρητικότητας με χρήση του COPE όταν όλοι οι κόμβοι έχουν πάντα σε αναμονή πακέτα προς αποστολή και χρησιμοποιείται το MAC 802.11.

Πίνακας 1

3.2 Γενική Επισκόπηση

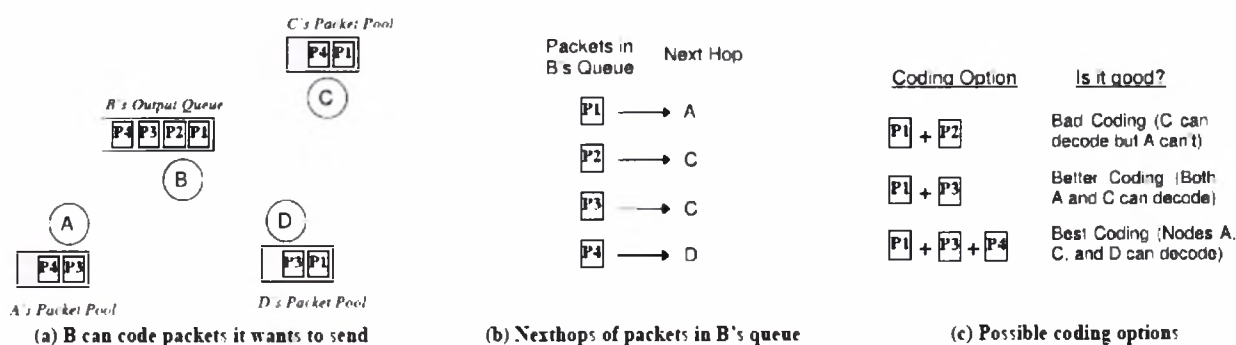
Η λειτουργία του COPE στηρίζεται στις παρακάτω τεχνικές:

1. **Opportunistic Listening:** Η broadcast ιδιότητα του ασύρματου μέσου δίνει την δυνατότητα στους κόμβους που διαθέτουν ομοιο-κατευθυντική κεραία να ‘ακούνε’ πακέτα που δεν προορίζονται για αυτούς. Το COPE δίνει την ελευθερία στους κόμβους να ‘κατασκοπεύουν’ τις επικοινωνίες στο δίκτυο και να αποθηκεύουν ξένα πακέτα για περιορισμένο χρονικό διάστημα T . Για καλύτερη επίδοση το T θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την μέγιστη καθυστέρηση πακέτου. Για ένα δίκτυο 11 Mbps και $T=500\text{ms}$ ένας αποθηκευτικός χώρος των 750 Kbytes είναι αρκετός. Επιπλέον κάθε κόμβος εκπέμπει Αναφορές Λήψης (Reception Reports) ώστε να πληροφορήσει τους γείτονες του για το ποια πακέτα έχει στην αποθήκη του. Οι αναφορές αυτές επισυνάπτονται στα πακέτα δεδομένων. Όταν ένας κόμβος δεν έχει πακέτα δεδομένων προς αποστολή περιοδικά αποστέλλει αναφορές σε ειδικά πακέτα ελέγχου.
2. **Opportunistic Coding:** Το κύριο ερώτημα είναι ποια πακέτα πρέπει να κωδικοποιηθούν μαζί ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα. Ο κάθε κόμβος επιλέγει μεταξύ των πακέτων βασισμένος στις τοπικές πληροφορίες που διαθέτει. Σε κάθε κόμβο μπορεί να παρουσιαστούν πολλές επιλογές κωδικοποίησης αλλά η τελική επιλογή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μεγιστοποιείται ο αριθμός των πακέτων προς αποστολή σε μία μόνο μετάδοση επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα ότι το ο επόμενος παραλήπτης (nexthop) κάθε πακέτου θα έχει αρκετή πληροφορία ώστε να αποκωδικοποιήσει τα δεδομένα που προορίζονται για αυτόν. Για να εξασφαλιστεί αυτό κάθε κόμβος ακολουθεί τον παρακάτω κανόνα:

Για την αποστολή n πακέτων p_1, p_2, \dots, p_n σε n nexthops r_1, r_2, \dots, r_n αντίστοιχα, ένας κόμβος μπορεί να κωδικοποιήσει και τα n πακέτα μαζί μόνο εάν κάθε nexthop r_i έχει αποθηκευμένα όλα τα υπόλοιπα $n-1$ πακέτα p_j , για $j \neq i$.

Όταν ένας κόμβος έχει την ευκαιρία να μεταδώσει ένα πακέτο ψάχνει το μέγιστο n που ικανοποιεί αυτόν τον κανόνα. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί ένας κόμβος να μάθει την κατάσταση ενός γείτονα, δηλαδή ποια πακέτα διαθέτει στην αποθήκη του, περιγράφονται παρακάτω. Στην Εικόνα3 απεικονίζονται 4 κόμβοι. Ο Β έχει 4 πακέτα προς αποστολή. Το next hop καθενός από αυτά τα πακέτα φαίνεται στην Εικόνα3b. Επίσης στην Εικόνα3a φαίνονται ποια πακέτα έχουν ήδη ληφθεί από τους υπόλοιπους κόμβους. Ο Β πριν στείλει το πρώτο πακέτο στην ουρά, το $p1$ δηλαδή, θα αναζητήσει ποια πακέτα μπορούν να κωδικοποιηθούν μαζί του. Μία πρώτη επιλογή θα ήταν το $p1 \oplus p2$. Αυτή η απόφαση όμως θα ήταν άστοχη. Ο C μπορεί να αποκωδικοποιήσει το $p1 \oplus p2$ και να εξάγει το πακέτο που τον ενδιαφέρει, το $p2$ δηλαδή, γιατί έχει ήδη γνώση του $p1$. Ο Α όμως δεν έχει λάβει το $p2$ οπότε δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει το πακέτο. Μία άλλη επιλογή θα ήταν το $p1 \oplus p3$. Τα δύο next hops των πακέτων μπορούν να αποκωδικοποιήσουν το $p1 \oplus p3$ και να λάβουν το πακέτο που τους ενδιαφέρει γιατί γνωρίζουν ήδη το άλλο πακέτο. Η βέλτιστη όμως επιλογή είναι το $p1 \oplus p3 \oplus p4$. Ο Α γνωρίζει τα $p3, p4$, ο C γνωρίζει τα $p1, p4$ και ο D γνωρίζει τα $p1, p3$ οπότε όχι μόνο κάθε κόμβος μπορεί να εξάγει το πακέτο που τον ενδιαφέρει από το κωδικοποιημένο αλλά μεγιστοποιείται και ο αριθμός των πακέτων που αποστέλλονται με μία μόνο μετάδοση.

Στο παράδειγμα αυτό φαίνεται ότι πακέτα από διαφορετικές ροές μπορούν να κωδικοποιηθούν σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο. Όταν τα μονοπάτια τους χρειαστεί να διακλαδωθούν πρέπει να αποκωδικοποιηθούν και να σταλούν σε διαφορετικά πακέτα. Ειδάλλως, άχρηστα δεδομένα θα μεταφέρονται σε περιοχές του δικτύου όπου δεν υπάρχει κανένας ενδιαφερόμενος παραλήπτης και θα καταναλωθεί άσκοπα εύρος ζώνης.



Εικόνα 3

3. **Learning Neighbor State:** Κάθε κόμβος γνωρίζει ποια πακέτα είναι αποθηκευμένα σε κάθε γείτονα καθώς λαμβάνει τις Αναφορές Λήψης τους (Reception Reports). Ακόμα και όταν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο και υπάρχει πιθανότητα οι αναφορές να χαθούν, ένας κόμβος μπορεί έξυπνα να μαντέψει εάν ένα πακέτο υπάρχει σε κάποιον άλλο κόμβο: Οι πιθανότητες επιτυχημένης μετάδοσης σε κάθε ζεύξη υπολογίζονται περιοδικά και αποστέλλονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Έτσι, η πιθανότητα ένας κόμβος να διαθέτει ένα συγκεκριμένο πακέτο υπολογίζεται ίση με την πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ενός πακέτου πάνω στην ζεύξη που ενώνει τον κόμβο αυτόν με τον προηγούμενο παραλήπτη (previous hop) του πακέτου. Περιστασιακά, όταν ο αποστολέας ενός κωδικοποιημένου πακέτου έχει συμπεράνει λάθος για την ύπαρξη ενός πακέτου σε έναν κόμβο αυτό οδηγεί σε μη-αποκωδικοποιήσιμα (non-decodable) δεδομένα. Σε αυτήν την περίπτωση τα πακέτα που δεν μπόρεσαν να αποκωδικοποιηθούν αποστέλλονται ξανά και ενδεχομένως κωδικοποιούνται με κάποιο άλλο σερ πακέτων.

3.3 Μεγέθη Απόδοσης COPE

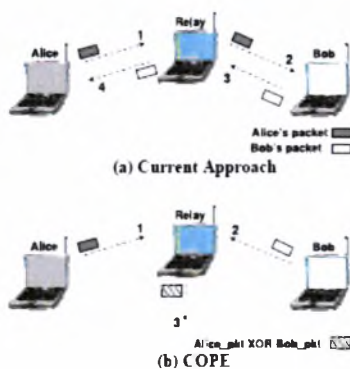
Όταν εφαρμόζεται το COPE σε ένα δίκτυο το κέρδος που αναμένεται κάθε φορά εξαρτάται από:

- Το επίπεδο συμφόρησης στο δίκτυο (congestion level), δηλαδή από το offered load σε κάθε κόμβο. Εάν στο δίκτυο δεν υπάρχει κίνηση οι ροές σπανίως συναντώνται στους κόμβους, συνεπώς οι ουρές των κόμβων είναι μικρές και δεν βρίσκονται κατάλληλα πακέτα προς κωδικοποίηση. Εάν πάλι το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο πολλά πακέτα χάνονται οπότε το εύρος ζώνης χρησιμοποιείται άσκοπα.
- Τον σχηματισμό της κίνησης (traffic pattern), δηλαδή διαφορετικές τοπολογίες ή διαφορετικά σερ ροών δεδομένων στην ίδια τοπολογία μεταβάλλουν διαφορετικά το τελικό κέρδος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ροές πληροφορίας σε κάθε δίκτυο δεν διασταυρώνονται στους ίδιους κόμβους ή τουλάχιστον όχι με την ίδια συχνότητα οπότε μεταβάλλεται και πάλι ο αριθμός των ευκαιριών κωδικοποίησης.

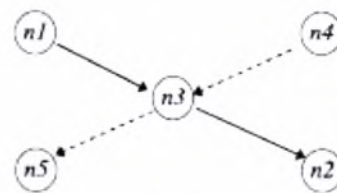
- Το πρωτόκολλο μεταφοράς (transport protocol). Το TCP αντιμετωπίζει το χάσιμο πακέτων ως σημάδι υπερφόρτωσης του δικτύου μειώνοντας τον ρυθμό μετάδοσης, μειώνοντας όμως έτσι και τις ευκαιρίες κωδικοποίησης και τελικά το κέρδος του COPE. Αυτό είναι και ο λόγος που το COPE δίνει καλύτερα αποτελέσματα με UDP απ' ότι με TCP.

Και στις 3 περιπτώσεις φαίνεται ότι τελικώς η αποδοτικότητα του COPE εξαρτάται από τις προσφερόμενες ευκαιρίες κωδικοποίησης. Το κέρδος που αποφέρει μπορεί να μετρηθεί από τα εξής μεγέθη:

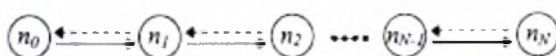
Coding Gain: Ο λόγος του αριθμού των απαιτούμενων μεταδόσεων για την παράδοση κάποιου σετ πακέτων χωρίς την χρήση του COPE προς τον αριθμό των απαιτούμενων μεταδόσεων για την παράδοση του ίδιου σετ πακέτων κάνοντας χρήση του COPE. Εξ' ορισμού το μέγεθος αυτό είναι πάντα μεγαλύτερο ή ίσο του 1.



Εικόνα 4a - Alice&Bob



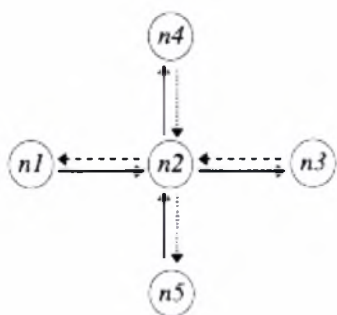
Εικόνα 4b - X topology



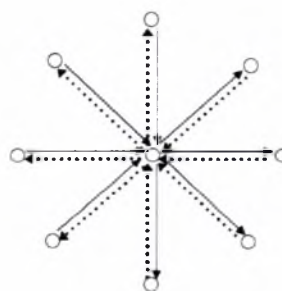
Εικόνα 4c - Line

Εικόνα 4

Στο παράδειγμα Alice&Bob (Εικόνα4a) όπου υπάρχει μία αμφίδρομη ροή το COPE μειώνει τον αριθμό απαιτούμενων μεταδόσεων από 4 σε 3. Συνεπώς το Coding Gain ισούται με $4/3=1,33$. Σε άλλες τοπολογίες το coding gain αυξάνεται ακόμα περισσότερο λόγω του Opportunistic Listening. Η τοπολογία-X (Εικόνα4b) αποτελείται από 2 ξεχωριστές ροές που συναντώνται στον κεντρικό κόμβο n3. Χωρίς Opportunistic Listening το COPE δε θα μπορούσε να συνδυάσει τις 2 ροές καθώς οι κόμβοι n5,n2 δε θα μπορούσαν να αποκωδικοποιήσουν ένα κωδικοποιημένο πακέτο. Με Opportunistic Listening όμως οι κόμβοι n5,n2 ακούνε τα πακέτα p1,p2 αντίστοιχα που στέλνουν οι κόμβοι n1,n4 και τα αποθηκεύουν. Έτσι ο κόμβος n3 μπορεί να κωδικοποιήσει τα p1,p2 σε ένα πακέτο $p1 \oplus p2$ και να το στείλει καθώς θα είναι αποκωδικοποιήσιμο από τους n5,n2. Συνεπώς το Coding Gain φτάνει και πάλι το $4/3$. Στην Εικόνα4c, τοπολογία γραμμής, κάθε κόμβος έχει 2 γείτονες. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω του κανόνα που αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι δυνατή η κωδικοποίηση μόνο 2 πακέτων αφού υπάρχουν μόνο 2 δυνατά nexthops. Το coding gain φτάνει το 2 καθώς σε κάθε μετάδοση κάθε κόμβος έχει την δυνατότητα να στείλει 2 πακέτα. Η τοπολογία-cross (Εικόνα5a) συνδυάζει τα παραδείγματα του Alice&Bob και της τοπολογίας-X. Δύο αμφίδρομες ροές που συναντώνται στον κεντρικό κόμβο. Σε αυτήν την περίπτωση οι απαιτούμενες μεταδόσεις μειώνονται από 8 σε 5. Συνεπώς, το Coding Gain φτάνει το $8/5=1,6$.



Εικόνα 5a - Cross



Εικόνα 5b - Wheel

Εικόνα 5

Coding and MAC Gain: Το αναμενόμενο κέρδος χωρητικότητας με χρήση του COPE όταν όλοι οι κόμβοι έχουν πάντα σε αναμονή πακέτα προς αποστολή και χρησιμοποιείται το MAC 802.11.

Το Coding and MAC κέρδος γίνεται κατανοητό στο παράδειγμα του Alice&Bob. Το MAC για λόγους δικαιοσύνης διαιρεί το εύρος ζώνης σε 3 ίσα μέρη, ένα για κάθε κόμβο. Χωρίς network coding όμως ο router χρειάζεται το διπλάσιο εύρος ζώνης από τους άλλους κόμβους καθώς πρέπει να μεταδώσει τα διπλάσια πακέτα. Επειδή η κίνηση προς τον router είναι διπλάσια ενώ το εύρος ζώνης που του αναλογεί είναι ίδιο με τους άλλους δύο κόμβους η ουρά του router αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Το COPE κωδικοποιώντας ζεύγη πακέτων επιτρέπει την αποσυμφόρηση της ουράς με διπλάσιο ρυθμό, διπλασιάζοντας έτσι την χωρητικότητα του δικτύου. Συνεπώς το Coding and MAC gain είναι 2.

Στην περίπτωση της τοπολογίας-X ο κεντρικός κόμβος κωδικοποιεί επίσης τα πακέτα ανά ζεύγη συνεπώς το Coding and MAC gain είναι πάλι 2. Στην τοπολογία-line μόνο 2 πακέτα μπορούν να γίνουν xored κάθε φορά άρα το Coding and MAC gain είναι ίσο με 2. Στην τοπολογία-cross η αποσυμφόρηση της ουράς του κεντρικού κόμβου γίνεται με τετραπλάσιο ρυθμό συγκριτικά με no coding, δεδομένου του προκαθορισμένου εύρους ζώνης που του έχει ανατεθεί από το MAC. Αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί τα πακέτα της ουράς στον κόμβο αυτόν μπορούν να κωδικοποιηθούν ανά τέσσερα. Συνεπώς το Coding and MAC gain ισούται με 4. Συμπερασματικά, είναι εμφανές ότι το μέγιστο Coding and MAC gain απουσία Opportunistic Listening είναι 2 για οποιαδήποτε τοπολογία. Παρουσία Opportunistic Listening όμως, μπορεί να γίνει άπειρο όπως συμβαίνει στην περίπτωση της τοπολογίας-wheel (Εικόνα 5b). Εάν υπάρχουν N ακριανοί κόμβοι, τότε ο κεντρικός μπορεί να κωδικοποιήσει μέχρι και N πακέτα μαζί, συνεπώς το Coding and MAC gain φτάνει το N . Καθώς το $N \rightarrow \infty$ το Coding and MAC gain $\rightarrow \infty$ επίσης. Το παράδειγμα αυτό είναι θεωρητικό, είναι όμως ενδεικτικό του κέρδους χωρητικότητας που μπορεί να επιτευχθεί από το COPE.

Throughput Gain: Το ποσοστιαίο κέρδος σε χωρητικότητα όταν γίνεται χρήση του COPE.

Συνοπτικά τα κέρδη αναγράφονται στον Πίνακα2.

Topology	Coding Gain	Coding+MAC Gain
Alice&Bob	1.33	2
X-topology	1.33	2
Cross	1.6	4
Infinite Wheel	2	∞
Infinite Chain	2	2

Πίνακας 2

3.4 Σχεδιαστικές Αρχές

Το COPE ακολουθεί τις εξής σχεδιαστικές αρχές ώστε να ενσωματωθεί επιτυχώς στην δικτυακή στοίβα (network stack).

Κωδικοποίηση

- Τα πακέτα δεν καθυστερούνται ποτέ από τον αποστολέα (Never Delaying Packets): Επιλέγεται προς αποστολή πάντα το πρώτο πακέτο στην ουρά του κόμβου. Έπειτα ελέγχονται τα υπόλοιπα πακέτα στην ουρά και αν βρεθεί κάποιο κατάλληλο κωδικοποιείται με το αρχικό και αποστέλλεται η xored έκδοση. Εάν δε βρεθεί κάποιο κατάλληλο προς κωδικοποίηση τότε ο κόμβος δεν περιμένει την λήψη κάποιου πακέτου που θα μπορούσε να κωδικοποιηθεί με το αρχικό αλλά στέλνει το αρχικό ώστε να αποφευχθεί η καθυστέρησή του.
- Προτίμηση στην κωδικοποίηση πακέτων όμοιου μεγέθους (Preference to Xoring Packets of Similar Size): Η κωδικοποίηση ενός μικρού με ένα μεγάλο πακέτο απαιτεί το συμπλήρωμα του μικρού πακέτου με πρόσθετα μηδενικά ώστε το μέγεθός του να γίνει ίδιο με το μέγεθος του μεγάλου πακέτου και να είναι δυνατή η κωδικοποίηση. Αυτό όμως οδηγεί σε κατάχρηση του εύρους ζώνης. Η κατανομή του μεγέθους πακέτων που μεταφέρονται μέσω διαδικτύου έχει 2

κορυφές, τα 40 και τα 1500 bytes. Συνεπώς διαχωρίζοντας τα πακέτα σε μικρά (<100 bytes) και μεγάλα (>100 bytes) και αναζητώντας πακέτα προς κωδικοποίηση που ανήκουν στην ίδια κατηγορία μειώνεται ο φόρτος αναζήτησης και η κατάχρηση του εύρους ζώνης.

- Πακέτα με τον ίδιο επόμενο κόμβο-παραλήπτη δεν κωδικοποιούνται μαζί (Never Code Packets Heading to the Same Nexthop): Δεν επιλέγονται ποτέ προς κωδικοποίηση δυο πακέτα που έχουν την ίδια κατεύθυνση καθώς δεν θα είναι δυνατή η αποκωδικοποίησή τους από τον κόμβο αυτόν.
- Εξέταση καταλληλότητας πακέτων σύμφωνα με την σειρά τους στην ουρά του κόμβου (Consideration of Packets According to their Order in the Output Queue): Τα πακέτα προς κωδικοποίηση ελέγχονται με την σειρά έτσι ώστε όταν λαμβάνονται από τον παραλήπτη τους να μην υπάρχουν μεγάλα κενά στην αλληλουχία μιας ροή δεδομένων καθώς το TCP θεωρεί ότι αυτό είναι σημάδι συμφόρησης του δικτύου και μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών.
- Πιθανότητα αποκωδικοποίησης P_D (Decoding Probability P_D): Για να επιλεγεί ένα πακέτο προς κωδικοποίηση με ένα άλλο πρέπει η πιθανότητα αποκωδικοποίησης (Decoding Probability P_D) όλων των πακέτων στα nexthop τους να είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι $G=0,8$. Το P_D για ένα πακέτο ισούται της πιθανότητας το nexthop αυτού του πακέτου να έχει ακούσει και αποθηκεύσει όλα τα άλλα native πακέτα που έχουν κωδικοποιηθεί μαζί του :

$$P_D = P_1 * P_2 * P_3 * \dots$$

όπου κάθε P_i (η πιθανότητα του nexthop να έχει ακούσει ένα πακέτο i) υπολογίζεται είτε μέσω των Reception Reports που στέλνει κάθε κόμβος είτε με Guessing. Δηλαδή αν ένας κόμβος K έχει μόλις στείλει ένα πακέτο i στον Λ το $P_K(i)=1$ ενώ το $P_\Lambda(i)=\text{link delivery probability}[K \rightarrow \Lambda]$.

Αποκωδικοποίηση

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μη-κωδικοποιημένο πακέτο τότε εξετάζεται εάν ο ίδιος είναι το nexthop του. Αν όχι, τότε σημαίνει ότι λήφθηκε λόγω opportunistic listening και αποθηκεύεται σε έναν πίνακα κατακερματισμού για μελλοντική χρήση στην αποκωδικοποίηση κάποιου μηνύματος.

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο κωδικοποιημένο με άλλα n πακέτα, εξετάζεται εάν ο ίδιος είναι το nexthop ενός εκ των native πακέτων που έχουν κωδικοποιηθεί μαζί. Αν δεν είναι μέσα στα nexthops, τότε σημαίνει ότι λήφθηκε λόγω opportunistic listening και αποθηκεύεται. Αν όμως ο κόμβος είναι ένα από τα nexthops, τότε αποκωδικοποιεί το πακέτο κάνοντας το χοι με τα υπόλοιπα $n-1$ πακέτα που ανακτά από την αποθήκη του, οπότε τελικώς εξάγει τα δεδομένα του μηνύματος που τον ενδιαφέρουν.

Υπάρχει περίπτωση να ληφθεί ένα κωδικοποιημένο πακέτο από έναν κόμβο που ανήκει στα nexthops αλλά να μην είναι δυνατή η αποκωδικοποίησή του. Αυτό συμβαίνει λόγω λανθασμένης πρόβλεψης σχετικά με την άφιξη των υπολοίπων $n-1$ πακέτων στον κόμβο αυτόν. Σε αυτήν την περίπτωση το πακέτο απλά αγνοείται, οπότε σε σύντομο χρονικό διάστημα θα ξανασταλθεί.

Pseudo-Broadcast

Το MAC 802.11 έχει δύο τρόπους λειτουργίας: unicast και broadcast. Από την στιγμή που το COPE εκπέμπει τα πακέτα σε όλους τους γείτονες το θεμιτό θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ο broadcast τρόπος λειτουργίας. Η επιλογή αυτή όμως δεν αποδίδει λόγω έλλειψης αξιοπιστίας και μηχανισμών ρύθμισης ροής (back off mechanisms).

Στο 802.11 unicast τα πακέτα επιβεβαιώνονται απευθείας από το επόμενο nexthop. Η αξιοπιστία επιτυγχάνεται με την αναμετάδοση των πακέτων μέχρι να ληφθεί μία επιβεβαίωση. Η έλλειψη επιβεβαίωσης ερμηνεύεται ως σημάδι συμφόρησης και ως λύση ο αποστολέας μειώνει εκθετικά την ροή μετάδοσης δεδομένων.

Σε αντίθεση στο 802.11 broadcast υπάρχει έλλειψη τόσο αξιοπιστίας όσο και μηχανισμών ελέγχου ροής. Ένα πακέτο που γίνεται broadcasted έχει πολλούς παραλήπτες και έτσι δεν είναι ξεκάθαρο ποιος πρέπει να στείλει επιβεβαίωση στον αποστολέα. Λόγω της απουσίας επιβεβαιώσεων ο αποστολέας δεν αναμεταδίδει δεδομένα και συνεπώς δεν προσφέρει αξιοπιστία. Επιπλέον μια πηγή που χρησιμοποιεί το 802.11 broadcast δεν μπορεί να εντοπίσει συγκρούσεις οπότε δεν μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Έτσι αν όλοι οι κόμβοι συνεχίσουν να στέλνουν με τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης η χωρητικότητα που θα επιτευχθεί θα είναι πολύ χαμηλή λόγω του μεγάλου αριθμού συγκρούσεων.

Η λύση λέγεται pseudo-broadcast. Το pseudo-broadcast στέλνει τα broadcast πακέτα χρησιμοποιώντας το unicast mode του 802.11. Το πεδίο προορισμού που υπάρχει στην επικεφαλίδα MAC συμπληρώνεται με την MAC διεύθυνση ενός εκ των κόμβων για τους οποίους προορίζεται το πακέτο. Έπειτα προστίθεται η COPE επικεφαλίδα. Στην επικεφαλίδα αυτή περιλαμβάνονται οι αναφορές λήψης, οι επιβεβαιώσεις καθώς και μία λίστα με όλους τους παραλήπτες του πακέτου. Λόγω opportunistic listening οι κόμβοι μπορούν να ακούσουν πακέτα τα οποία δεν προορίζονται για αυτούς. Έτσι όταν ένας κόμβος λάβει ένα πακέτο ελέγχει την επικεφαλίδα COPE για να ελέγξει αν είναι ένας από τους παραλήπτες. Εάν δει ότι είναι, το επεξεργάζεται περαιτέρω. Αν όχι, το αποθηκεύει. Με αυτόν τον τρόπο, εφόσον όλα τα πακέτα στέλνονται με 802.11 unicast το MAC μπορεί να εντοπίσει συγκρούσεις και να μειώσει κατάλληλα τον ρυθμό μετάδοσης.

Επιβεβαιώσεις

Ένα κωδικοποιημένο πακέτο απευθύνεται σε πολλά nexthops αλλά επιβεβαίωση στον αποστολέα στέλνεται μόνο από το ένα nexthop που έχει τεθεί στην επικεφαλίδα MAC ως παραλήπτης. Επίσης, ένα encoded πακέτο μπορεί λόγω λανθασμένης πρόβλεψης να μην είναι αποκωδικοποιήσιμο από ένα nexthop. Συνεπώς, καθίσταται η ανάγκη για βήμα-προς-βήμα (hop-by-hop) επιβεβαιώσεις όπου κάθε nexthop επιβεβαιώνει την άφιξη ενός πακέτου στο previous hop.

Για τα μη-κωδικοποιημένα πακέτα αυτές οι βήμα-προς-βήμα επιβεβαιώσεις είναι ουσιαστικά οι σύγχρονες επιβεβαιώσεις που στέλνονται μέσω ειδικών πακέτων από το 802.11. Η επέκταση των σύγχρονων επιβεβαιώσεων για τα κωδικοποιημένα πακέτα θα είχε απαγορευτικό κόστος σε εύρος ζώνης (bandwidth), συνεπώς οι hop-by-hop επιβεβαιώσεις υλοποιούνται με ασύγχρονο τρόπο. Όταν ένας κόμβος στέλνει η πακέτα μαζί σε ένα encoded, προγραμματίζει αναμετάδοση για κάθε ένα από αυτά τα πακέτα. Εάν κάποιο από αυτά δεν επιβεβαιωθεί μέσα σε χρόνο Τα δεύτερα, το πακέτο εισάγεται στην αρχή της ουράς και ξαναστέλνεται πιθανώς πάλι κωδικοποιημένο με κάποιο άλλο σερβιερ πακέτων. Το Τα είναι λίγο μεγαλύτερο από το χρόνο μετάδοσης και επιστροφής (RTT) σε μία ζεύξη. Ένα nexthop που λαμβάνει ένα κωδικοποιημένο πακέτο, εξάγει το πακέτο που του αντιστοιχεί και προγραμματίζει μία επιβεβαίωση (ack event). Πριν το nexthop αυτό στείλει ένα πακέτο, συμπληρώνει την επικεφαλίδα COPE με τις εκκρεμείς επιβεβαιώσεις. Εάν το nexthop δεν έχει άλλα πακέτα προς αποστολή τότε περιοδικά στέλνει ειδικά πακέτα ελέγχου για τις επιβεβαιώσεις. Οι γείτονες που λαμβάνουν ή ακούν τα πακέτα του κόμβου διαβάζουν την επικεφαλίδα COPE, συνεπώς λαμβάνουν τις επιβεβαιώσεις και αναλόγως ακυρώνουν ή όχι την αναμετάδοση των αντίστοιχων πακέτων.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

4.1 Μετρήσεις σε Ad Hoc Δίκτυα

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Basic Rate	1 Mbps
Packet Size	500 bytes
Propagation Type	TwoRayGround
Antenna Type	OmniAntenna
Channel Type	WirelessChannel
MAC Type	802_11
RTS/CTS	Disabled
Routing Protocol	AODV

Πίνακας 3:

Τιμές Παραμέτρων που Χρησιμοποιήθηκαν για τα Πειράματα

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ

Έπειτα από μετρήσεις σε μερικές στάνταρ τοπολογίες, οι οποίες απεικονίζονται στις Εικόνες 4 και 5, και για διαφορετικά επίπεδα φόρτου (offered load) στους κόμβους υπολογίζεται ο μέσος όρος των coding gains. Παρακάτω αναγράφεται το υπολογισμένο καθώς και το θεωρητικά αναμενόμενο coding gain το οποίο αποκλίνει από το μετρούμενο λόγω ασυμμετρίας στις ροές δεδομένων.

Alice&Bob

Theoretical CG = 1.33

$CG_{avg} = 1.22$

X-topology

Theoretical CG = 1.33

$CG_{avg} = 1.20$

Cross

Theoretical CG = 1.6

$CG_{avg} = 1.31$

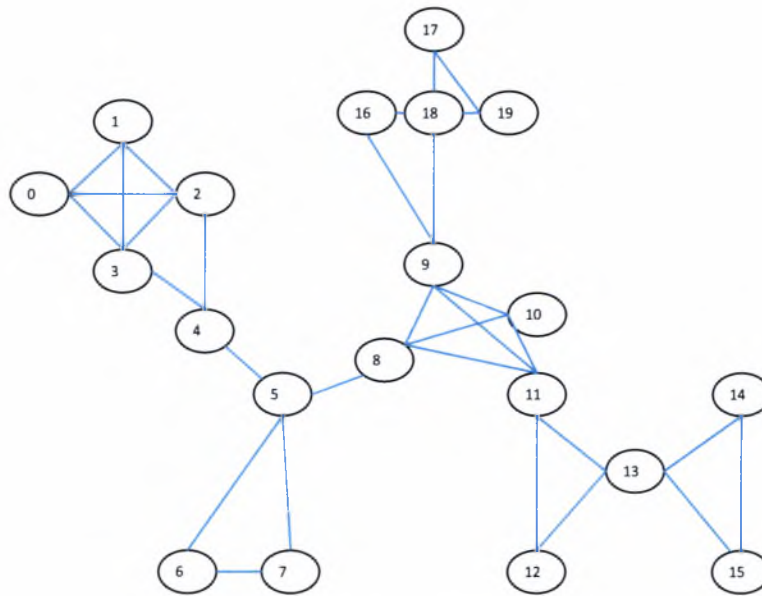
Wheel

Theoretical CG = 2

$CG_{avg} = 1.14$

AVERAGE ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΜΙΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ 20 ΚΟΜΒΩΝ

ΜΕ 3 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΤ ΡΟΩΝ



20Node Topology

Οι συνδέσεις μεταξύ κόμβων συμβολίζουν γειτνίαση (distance < 250 m).

Average Μετρήσεις

Traffic Pattern 1

10 Flows: 14->12 , 11->15 , 19->16 , 9->17 , 8->7 , 4->8 , 1->5 , 6->2 , 10->5 , 5->10

$CG_{udp}=1.039$

$CG_{tcp}= 1.005$

Throughput Gain_{udp}= 1.26%

Throughput Gain_{tcp}= 5.3%

Traffic Pattern 2

15 Flows: 18 ->8 , 16->10 , 11->18 , 8->16 , 10->4 , 4->7 , 6->8 , 10->12 , 8->15 , 12->9 , 11->15 , 15->11 , 14->12 , 1->5 , 6->2

$CG_{udp}=1.038$

$CG_{tcp}= 1.012$

Throughput Gain_{udp}= 7%

Throughput Gain_{tcp}= 6.8%

Traffic Pattern 3

10 Flows: 0->15 , 12->1 , 7->9 , 10->6 , 16->11 , 12->9 , 19->13 , 15->16 , 1->5 , 6->2

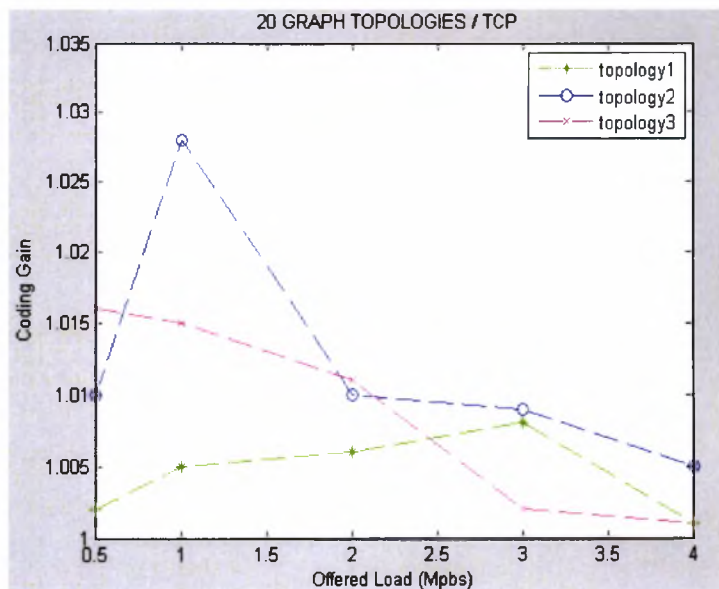
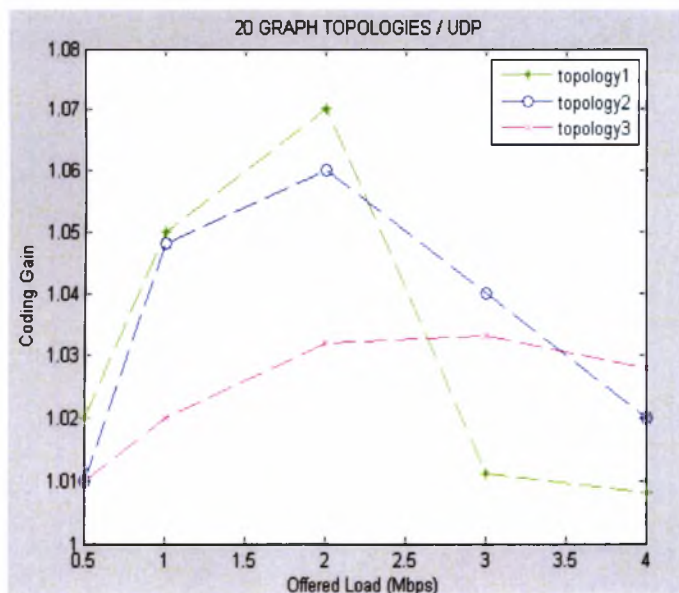
$CG_{udp}=1.028$

$CG_{tcp}= 1.011$

Throughput Gain_{udp}= 9%

Throughput Gain_{tcp}= 2.3%

Στα παρακάτω διαγράμματα είναι εμφανές ότι το κέρδος εξαρτάται από το congestion level στο δίκτυο, από το πρωτόκολλο μεταφοράς καθώς και από το traffic pattern όπως επεξηγήθηκε και νωρίτερα.



Congestion Level Comparison

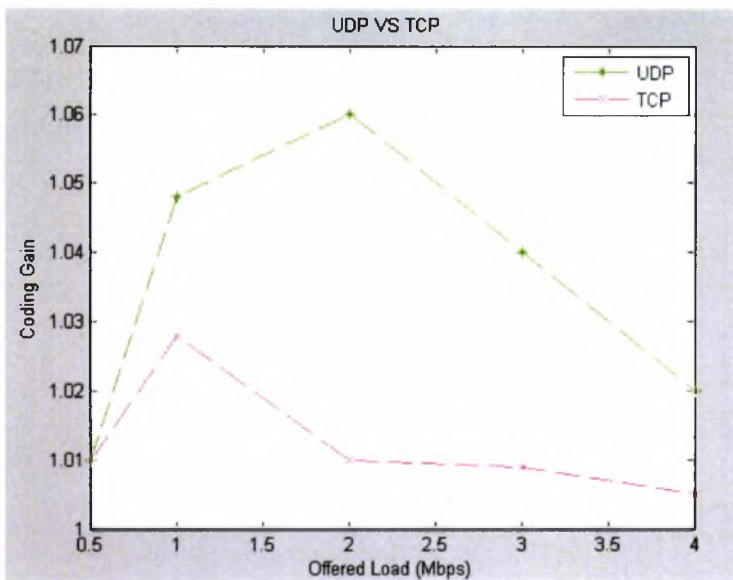
Σε ένα δίκτυο με 20 κόμβους παρατηρείται ότι ο βέλτιστος αριθμό ροών ισούται με 10 και το βέλτιστο μήκος μονοπατιού ισούται με 4 για maximum average coding gain. Επίσης, έπειτα από μετρήσεις σε 3 διαφορετικά δίκτυα, παρατηρήθηκε ότι οι περισσότερες ευκαιρίες κωδικοποίησης παρουσιάστηκαν όταν ο μέσος όρος γειτόνων σε κάθε κόμβο είναι 6.

Offered Load (Mbps)	0.5	1	2	3
5 flows	1.004	1.04	1.011	1.015
10 flows	1.02	1.05	1.07	1.011
15 flows	1.01	1.048	1.06	1.03

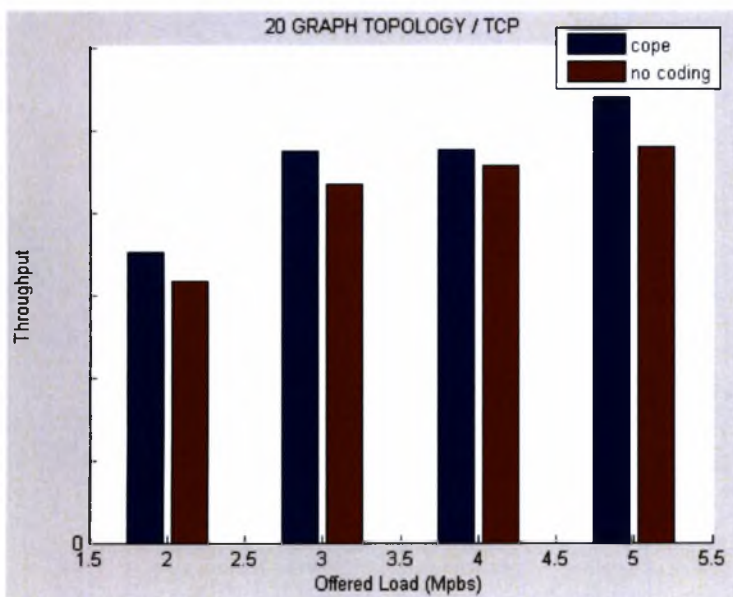
Coding Gain για διαφορετικό αριθμό ροών

Offered Load (Mbps)	0.5	1	2	3
2 hops	1.02	1.05	1.07	1.011
4 hops	1.036	1.147	1.06	1.01
6 hops	1.007	1.001	1.022	1.012

Coding Gain για διαφορετικά μήκη μονοπατιών



UDP Gain vs TCP Gain



TCP Throughput Gain over No Coding

4.2 Μετρήσεις σε Ad Hoc Δίκτυα Αισθητήρων

Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την μετάδοση ενός bit πληροφορίας σε ένα δίκτυο είναι ο πιο οικονομικός τρόπος επικοινωνίας. Γι' αυτό τον λόγο η αποδοτική κατανάλωση ενέργειας σε κάθε κόμβο είναι βασικός σχεδιαστικός παράγοντας. Το network coding επιτρέπει την εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα WSN, συνεπώς παρατείνει την διάρκεια ζωής του. Παρακάτω αναλύεται η αποδοτικότητα του COPE σε μερικά WSN.

Υποθέτουμε ότι οι κόμβοι διαθέτουν μνήμη. Ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως αλλά επίσης ορίζονται τα εξής μεγέθη για έναν κόμβο-αισθητήρα:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Initial Energy	5.0 J
Required Power to Receive (rx)	0.036
Required Power to Transmit (tx)	0.024
Energy Model	Battery
Dissemination Interval	0.005
Sensing Interval	0.005

Πίνακας 4:

Τιμές Παραμέτρων που Χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα σε Sensor Nets

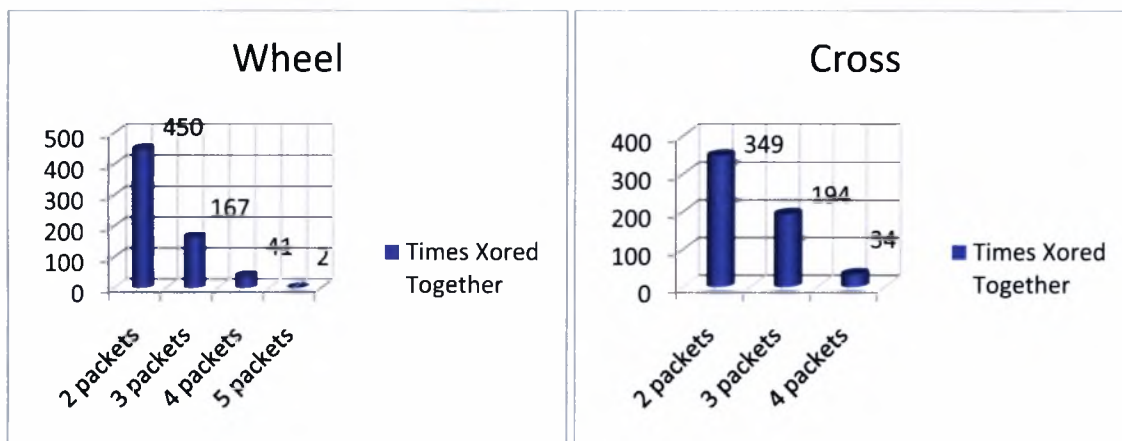
Μετρήσεις σε sensor networks 5 κόμβων τύπου cross και wheel είχαν τα εξής αποτελέσματα:

Alice&Bob $CG_{avg} = 1.21$

X-Topology $CG_{avg} = 1.18$

Cross $CG_{avg} = 1.31$

Wheel $CG_{avg} = 1.09$



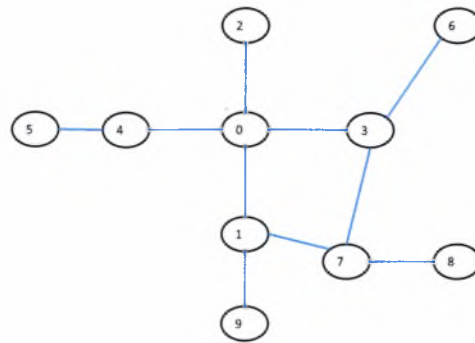
Συχνότητα κωδικοποίησης 2,3,4 και 5 πακέτων μαζί.

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η ενέργεια των κόμβων καθορίζει και την διάρκεια ζωής του δικτύου. Οι πηγές ενέργειας , όμως, στους κόμβους είναι ανεπαρκείς με αποτέλεσμα να περιορίζεται η λειτουργία του δικτύου.

Το COPE μπορεί να ωφελήσει την λειτουργία των WSN με 2 τρόπους. Είτε για την αύξηση της χωρητικότητας είτε για την εξοικονόμηση ενέργειας. Με χρήση δικτυακής κωδικοποίησης ένα σετ πακέτων προς μετάδοση μπορεί να αποσταλεί στους ενδιαφερόμενους παραλήπτες με λιγότερες μεταδόσεις. Αυτές οι μεταδόσεις που εξοικονομούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποστολή επιπλέον δεδομένων ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Ακόμα όμως και αν δεν στείλουν οι κόμβοι άλλα πακέτα, θα έχει εξοικονομηθεί η ενέργεια που απαιτούσαν οι επιπλέον μεταδόσεις με αποτέλεσμα την παράταση της ζωής του δικτύου.

Στους πίνακες παρακάτω αναγράφεται και η εξοικονόμηση ενέργειας σε κάθε πείραμα.

Τοπολογία 10 αισθητήρων με ένα κεντρικό access point διαθέσιμο.



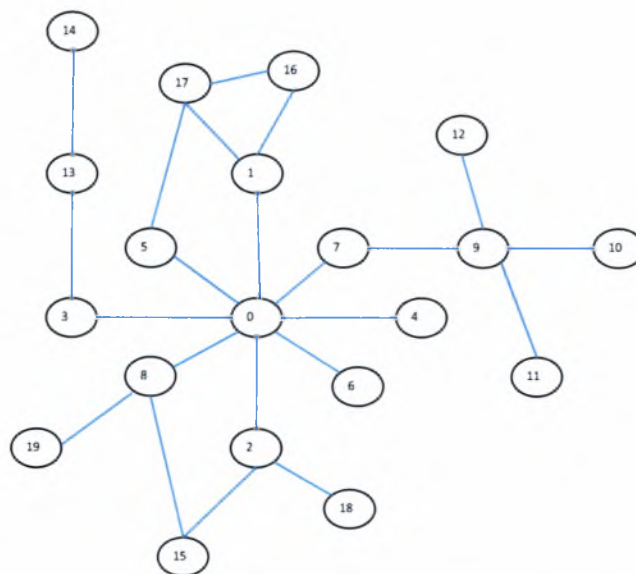
Οι συνδέσεις μεταξύ κόμβων συμβολίζουν γειτνίαση (distance < 40m)

6 UDP Ροές Δεδομένων: 1->2 , 2->1 , 3->4 , 5->3 , 6 ->8 , 8->9

Ο μέσος όρος των κόμβων που ακούνε ένα πακέτο σε κάθε μετάδοση είναι 4. Άρα σε κάθε μετάδοση που «σώζεται» εξοικονομείται ενέργεια από 4 κόμβους που θα παραλάμβαναν ένα πακέτο και 1 κόμβο που θα το μετέδιδε.

Gains Offered Load (Mbps)	Coding Gain	Throughput Gain	Saved Transmissions	Saved Energy= (4rx+tx)*Saved Transmissions (σε J)
0.5	1.26	26.4 %	668	88,18
0.7	1.12	12 %	343	45,28
1.0	1.08	7.9%	294	38,8
1.5	1.26	26.5 %	1094	144,4
2.0	1.11	11.4 %	502	66,26

Τοπολογία 20 αισθητήρων με ένα κεντρικό access point διαθέσιμο.



Οι συνδέσεις μεταξύ κόμβων συμβολίζουν γειτνίαση (distance < 40m)

15 UDP Ροές Δεδομένων: 1->2 , 2->1, 4->3, 3->4 , 5 -> 6, 6->5 , 7 ->8 , 8->7 , 7->10 , 10->7, 11->12, 12->11 , 15->16, 14->15, 17->18

Σε αυτήν την τοπολογία ο μέσος όρος των κόμβων που ακούνε ένα πακέτο σε κάθε μετάδοση είναι 9. Άρα σε κάθε μετάδοση που «σώζεται» εξοικονομείται ενέργεια από 9 κόμβους που θα παραλάμβαναν ένα πακέτο και 1 κόμβο που θα το μετέδιδε.

Gains Offered Load (Mbps)	Coding Gain	Throughput Gain	Saved Transmissions	Saved Energy= (9rx+tx)*Saved Transmissions (σε J)
0.5	1.25	24.7 %	561	141.3
0.7	1.14	13.6 %	353	89.9
1.0	1.056	5.8 %	180	45.4
1.5	1.08	8 %	344	86.6
2.0	1.073	7.3 %	309	77.8

5. ΣΥΝΟΨΗ

Η τεχνική του network coding βοηθάει στην αποδοτικότερη διάδοση της πληροφορίας στο δίκτυο καθώς επιτρέπει την ταχύτερη και ανθεκτικότερη μετάδοση δεδομένων. Το COPE, στηριζόμενο σε αυτήν την τεχνική, όταν εφαρμόζεται σε δίκτυα όπου οι κόμβοι δεν υπόκεινται σε περιορισμούς ενέργειας και μνήμης, επιτυγχάνει αύξηση της χωρητικότητας μέχρι και 70% όταν υπάρχουν TCP ροές ενώ μπορεί ακόμα και να αναδιπλώσει την μετρούμενη χωρητικότητα όταν χρησιμοποιούνται UDP ροές. Στα πειράματα φάνηκε ότι η ενσωμάτωση της δικτυακής κωδικοποίησης σε δίκτυα αισθητήρων μπορεί να εμφανίσει επίσης οφέλη όπως αύξηση της χωρητικότητας και εξοικονόμηση ενέργειας. Είναι ένα εργαλείο το οποίο επιδεικνύει την σημαντικότητα της δικτυακής κωδικοποίησης και υποδεικνύει την ανάγκη για σχεδίαση καινούριων δικτυακών πρωτοκόλλων βασισμένα στην νέα αυτή μέθοδο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Προσομοίωση Αρχιτεκτονικής COPE σε NS2

Στο παράρτημα αυτό περιγράφονται οι αλλαγές που έγιναν στον κώδικα του NS2 για την προσομοίωση της αρχιτεκτονικής COPE. Οι δομές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

Στο αρχείο mac80211.{cc, h} :

Κάθε κόμβος στο NS μεταξύ του LLC και του MAC υποστρώματος διατηρεί μία ουρά (IFQ) όπου αποθηκεύονται τα πακέτα προς αποστολή ή παραλαβή. Για την προσομοίωση κάθε κόμβος διατηρεί επίσης τις εξής δομές δεδομένων στο επίπεδο MAC:

- Ένα πίνακα κατακερματισμού pool όπου αποθηκεύονται τα πακέτα που είτε στάλθηκαν είτε ελήφθησαν από αυτόν τον κόμβο.
- Ένα πίνακα κατακερματισμού retransmission_pool όπου αποθηκεύονται πακέτα που κωδικοποιήθηκαν αλλά δεν έχουν επιβεβαιωθεί.
- Ν λίστες prob στις οποίες αποθηκεύεται η πιθανότητα κάθε γείτονα να έχει λάβει ένα πακέτο όπου N ο αριθμός των κόμβων.

Στο αρχείο packet.h :

Στο NS εκτός από τις επικεφαλίδες που προσαρτούνται στα πακέτα από κάθε στρώμα υπάρχει και μία επικεφαλίδα με κοινά πεδία για όλους τους τύπους πακέτου, η common header. Για την προσομοίωση, η common header διευρύνεται με πρόσθετα πεδία τα οποία απαρτίζουν την core header. Τα πεδία αυτά είναι:

- Μία δομή xored natives η οποία περιγράφει αν το πακέτο είναι κωδικοποιημένο και αν είναι ποια native πακέτα περιέχονται σε αυτό και ποιο είναι το next hop τους.
- Μία δομή reception report η οποία πληροφορεί τους παραλήπτες ποια άλλα πακέτα έχουν ληφθεί και αποθηκευθεί από τον αποστολέα.
- Μία δομή ack η οποία επιβεβαιώνει τους αποστολείς για τα παραληφθέντα πακέτα.

Υλοποίηση

Η υλοποίηση που περιγράφεται είναι σύμφωνη με τις σχεδιαστικές αρχές που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.4.

- Αναζήτηση Κατάλληλων Πακέτων στην IFQ

Επιλέγεται προς αποστολή πάντα το πρώτο πακέτο της ουράς IFQ του κόμβου. Έπειτα το πρωτόκολλο ψάχνει την IFQ για κατάλληλα πακέτα προς κωδικοποίηση. Κατάλληλο είναι ένα πακέτο με `direction: DOWN` όταν το `nexthop` του είναι διαφορετικό των υπόλοιπων ήδη κωδικοποιημένων πακέτων και η πιθανότητα αποκωδικοποίησης (`Decoding Probability P_D`) του πακέτου στο `nexthop` του είναι μεγαλύτερη από ένα κατώφλι $G=0.8$.

- Κωδικοποίηση

Εάν βρεθούν κατάλληλα πακέτα τότε τα δεδομένα τους κωδικοποιούνται μέσω του τελεστή `xor`. Μετά την κωδικοποίηση συμπληρώνεται το πεδίο `xored_natives` της `core_header` το οποίο πάντα περιέχει τις ταυτότητες των πακέτων που κωδικοποιήθηκαν μαζί και το `nexthop` του κάθε πακέτου.

- Αναφορές Λήψης

Κάθε φορά, πριν την αποστολή ενός πακέτου γίνεται έλεγχος της `pool` και εισάγονται στο πακέτο κάποιες `reception reports`. Όταν στέλνεται ένα πακέτο συμπληρώνεται το πεδίο `reception_report` της `common header` το οποίο δίνει πληροφορίες σε όσους κόμβους λάβουν το πακέτο για το ποια πακέτα έχουν ληφθεί μέχρι τώρα και είναι αποθηκευμένα από τον αποστολέα του πακέτου. Έτσι οι υπόλοιποι κόμβοι ανανεώνουν τις λίστες `prob` και μπορούν να λάβουν καλύτερες αποφάσεις σχετικά με το αν ένα κωδικοποιημένο πακέτο θα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί αργότερα από αυτόν τον κόμβο.

- Επιβεβαιώσεις και Αναμεταδόσεις

Οι επιβεβαιώσεις γίνονται βήμα-προς-βήμα. Δηλαδή κάθε `nexthop` επιβεβαιώνει την άφιξη ενός πακέτου στο προηγούμενο (`previous hop`). Αυτό γίνεται μετά από έλεγχο της `pool` και με το συμπλήρωμα του πεδίου `ack` της `common header` στα πακέτα που εξέρχονται από κάθε κόμβο. Έτσι ο κόμβος πληροφορεί τους γείτονες του για τα 9 πιο πρόσφατα πακέτα που έχει δεχτεί από τον καθένα τους.

Όλα τα πακέτα που τελικά θα κωδικοποιηθούν αποθηκεύονται πρώτα στην `retransmission pool` η οποία ελέγχεται κάθε φορά πριν την αποστολή ενός πακέτου. Αν δεν

επιβεβαιωθούν μέσα σε σταθερό χρονικό διάστημα. Τα τότε εισάγονται στην αρχή της ουράς και ξαναστέλνονται.

- Αποστολή

Το τελικό πακέτο αποστέλλεται. Λόγω της broadcast φύσης του ασύρματου δικτύου δεν θα παραληφθεί μόνο από το/τα nexthop(s) αλλά και από τους υπόλοιπους γειτονικούς κόμβους οι οποίοι εκείνη την στιγμή δεν είναι απασχολημένοι. Έτσι επιτυγχάνεται το opportunistic listening. Δηλαδή οι γειτονικοί κόμβοι ακούνε το πακέτο και το αποθηκεύουν ώστε να έχουν περισσότερες πιθανότητες αποκωδικοποίησης κωδικοποιημένων πακέτων στο μέλλον.

- Λήψη

Κατά την λήψη ενός πακέτου αρχικά ελέγχεται η core header για τα acks και ενημερώνεται η retransmission_pool. Έπειτα ελέγχεται η core_header για τα reception_reports και ενημερώνονται οι λίστες prob που περιέχουν όλες τις πιθανότητες κατοχής κάποιου πακέτου από τους γείτονες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]. Network Coding: An Instant Primer

C. Fragouli, J. Le Boudec, J. Widmer

[2]. The Importance of Being Opportunistic: Practical Network Coding for Wireless Environments

S. Katti, D. Katabi, W. Hu, H. Rahul, M. Medard

[3]. Xors in The Air: Practical Wireless Network Coding

S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, J. Crowcroft

[4]. An Analysis of Wireless Network Coding for Unicast Sessions: The Case for Coding-Aware Routing

S. Sengupta, S. Rayanchu, S. Banerjee

[5]. On the X-ities of Network Coding in Wireless Networks

Q. Dong, J. Wu, W. Hu, S. Banerjee, J. Crowcroft

[6]. Minimum Energy Multicast in Mobile Ad-Hoc Networks using Network Coding

Y. Wu, P. Chou, S. Kung

[7]. Network Coding for Large Scale Content Distribution

C. Gkantsidis, P. Rodriguez

[8]. Bidirectional Traffic/ Information Exchange in Wireless Networks with Network Coding and Physical-layer Broadcast

Y. Wu, P. Chou, S. Kung

[9]. A Network Coding Approach to Energy Efficient Broadcasting

C. Fragouli, J. Le Boudec, J. Widmer

[10]. Weakly Secure Network Coding

K. Bhattad, R. Narayanan

[11]. A Network Coding Approach to Overlay Network Monitoring

C. Fragouli, A. Markopoulou

[12]. Ubiquitous Access to Distributed Data in Large Scale Sensor Networks through Decentralized Erasure Codes

A. Dimakis, V. Prabhakaran, K. Ramchandran

NS

[1]. NS Simulator for Beginners

E. Altman and T. Jiménez

[2]. Marc Grey's Tutorial

[3]. The NS Manual (Notes and Documentation)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091647